

# 激光驱动冲击压缩下金属 Al 的高压声速研究

田宝贤, 王 钊, 李业军, 梁 晶, 韩茂兰, 汤秀章

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

**摘要:** 为研究 Al 材料的高压动态响应特性, 采用激光驱动冲击压缩加载法和加窗 VISAR 法, 开展了金属 Al 样品的高压声速研究, 并完成了相关靶物理过程模拟与小尺度靶结构参数设计。实验获得了冲击加载与追赶稀疏物理过程图像, 靶样品的纵波声速与理论预估结果相符。

**关键词:** 激光; 冲击压缩; VISAR; 纵波声速

中图分类号: O536

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)02-0218-06

doi: 10. 7538/yzk. 2015. 49. 02. 0218

## Study on High Pressure Sound Velocity for Metal Aluminum under Shock Compression Driven by Laser

TIAN Bao-xian, WANG Zhao, LI Ye-jun, LIANG Jing, HAN Mao-lan, TANG Xiu-zhang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

**Abstract:** To study the high pressure dynamic response characteristics of metal aluminum, the high pressure sound velocity experiment was carried out with laser driven shock compression loading method and window-VISAR method. The small scale target structure was designed according to the simulation result of the key physical process for high pressure sound velocity. The interference signals of the shock loading and rarefaction process were successfully observed by streak camera. The longitudinal wave sound velocity of metal aluminum sample is well consistent with the theoretical result.

**Key words:** laser; shock compression; VISAR; longitudinal wave sound velocity

高压声速表征材料高压状态下小扰动的传播速度, 反映了材料的高压动态响应特性。它不仅与材料本身的性质有关, 而且与材料所处的力学、热学状态也有密切的关系<sup>[1]</sup>。高压声速的测量研究, 对于开展材料的高压本构方程、高压物态方程及地核物理的研究具有重要意义。

目前高压声速测量主要是以轻气炮实验为主, 激光驱动声速研究报道极少, 国内尚未见报

道。激光驱动高压加载具有工作效率高、尺寸小、平面性好、安全可靠、无需接触炸药等危险品的特点。在高压声速测量中, 与轻气炮的  $\mu\text{s}$ 、 $\text{mm}$  量级的时空研究尺度相比, 激光驱动  $\text{ns}$ 、 $\mu\text{m}$  量级的研究尺度要小得多, 由于声速测量需对冲击压缩、追赶稀疏过程进行观测, 因此需合理的靶结构参数设计与精密的诊断测量。本工作基于天光一号 KrF 激光系统条件, 模拟分析声速测量中的冲击压缩、追赶稀疏等物理

过程与相应的靶结构参数,利用加窗 VISAR 法<sup>[2-3]</sup>初步开展激光驱动冲击压缩下金属 Al 材料的高压声速研究。

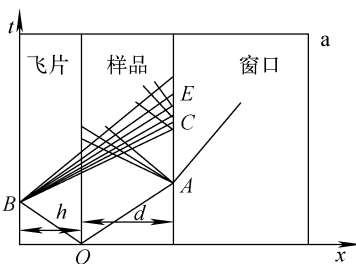
## 1 实验基本原理

高压声速测量靶的基本结构包括飞片、空腔、样品、透明窗口材料,如图 1 所示,利用 VISAR 干涉仪诊断技术,通过观测冲击压缩与追赶稀疏物理过程中样品/窗口界面粒子速度的两次变化实现声速的测量。为研究方便,实验采用相同材料的飞片、样品对称碰撞。激光由左侧入射烧蚀,驱动飞片飞行,飞行一段距离后达到稳定零压状态(内部无应力波系),当飞片撞击样品后,产生两个方向相反的冲击波,定义样品中的冲击波为主冲击波,飞片中的冲击波为左行冲击波。主冲击波到达样品/窗口界面时引起界面粒子速度发生突变(A 点  $t_0$  时刻),此后主冲击波透向窗内向内继续传播。飞片中左行冲击波到达飞片前表面会反射右行中心稀疏波(又称追赶稀疏波)向样品方向传输。追赶稀疏波沿传播路径对飞片、样品的高压状态进行卸载,当其到达样品/窗口界面时,界面粒子速度会骤然下降(C 点  $t_1$  时刻)。此后还有塑性卸载过程,以及塑性卸载波到达界面时引起的粒子速度变化(E 点),并可推广到卸载过程中速度剖面上任意 R 点对应的声速。根据该物理过程可得:

$$\Delta t_{AC} = t_1 - t_0 = \frac{h}{D} + \frac{h+d}{C_L} - \frac{d}{D} \quad (1)$$

其中: $D$  为飞片和样品中的冲击波速度; $C_L$  为 Lagrange 纵波声速; $h$  和  $d$  分别为飞片和样品的厚度。

由此可得到  $C_L$  为:



$$C_L = \frac{h+d}{D(t_1-t_0)-(h-d)}D \quad (2)$$

若压力较高使材料发生塑性形变,还可测到相应的塑性声速,即流体力学声速  $C_B$  为:

$$C_B = \frac{h+d}{D(t_2-t_0)-(h-d)}D \quad (3)$$

同理,加窗 VISAR 法还可反映卸载速度剖面上任意 R 点对应的声速  $C_R$ ,则:

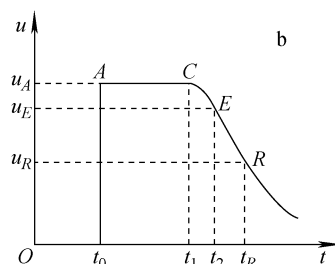
$$C_R = \frac{h+d}{D(t_R-t_0)-(h-d)}D \quad (4)$$

## 2 实验装置

激光驱动高压声速测量实验装置示意图如图 2 所示。该系统主要包括天光一号激光、真空靶室系统、干涉仪系统、内调焦望远镜系统以及深圳大学生产的可见光波段条纹相机等。其中天光一号系统为六路聚焦 248 nm 紫外 KrF 激光装置,最大能量输出超过 100 J、脉宽 27 ns、输出功率密度  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>、焦斑能量分布为平顶高斯光束、平顶尺寸 500  $\mu$ m,经 EFISI 平滑后平顶部分的均匀性好于 2%<sup>[4]</sup>。诊断系统由 VISAR 速度干涉仪<sup>[5]</sup>与条纹相机组成,VISAR 探测光源为 532 nm 固体激光器,条纹移动常数 2.5 km/s,空间分辨率小于 5  $\mu$ m,条纹相机选用 50 ns 量程,时间分辨 62.5 ps/pixel。内调焦望远镜利用其前向和侧向可实现样品靶的三维定位与光束聚焦调节。

## 3 冲击波物理模拟与靶结构参数设计

在高压声速测量中,靶结构参数设计对冲击压缩、追赶稀疏的物理过程有着决定性作用,特别是激光驱动小尺寸声速测量靶,结构参数与靶组件装配对实验的精度与成功率都有着重



a—Lagrange  $x-t$  坐标系下的应力波系图;b—界面粒子速度图

图 1 加窗 VISAR 法高压声速测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of high pressure sound velocity measurement using window-VISAR method

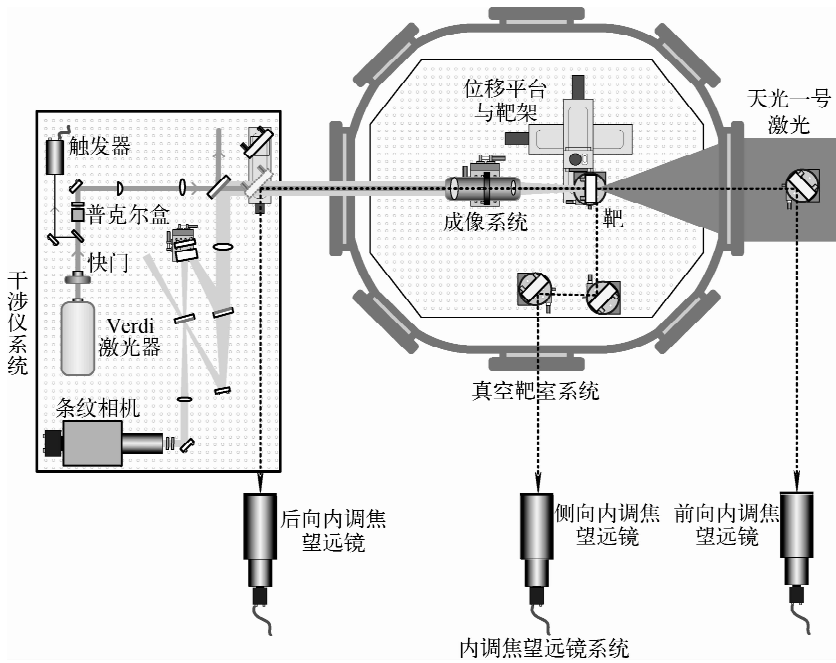


图2 激光驱动高压声速测量实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser driven high pressure sound velocity measurement experiment setup

要影响。声速测量中冲击波物理模拟与靶结构参数设计中的关键问题分析如下。

1) 二维侧向稀疏效应。声速测量原理是建立在一维平面冲击波物理过程基础上的,但在冲击压缩过程中飞片与样品中不可避免会产生二维侧向稀疏效应(由边界向中心传输侧向稀疏波)。因此要忽略该效应则要求样品的横向尺寸远大于其冲击压缩的纵向尺寸(沿光轴方向)。本实验辐照激光为  $500\ \mu\text{m}$  的平顶高斯光束,飞片与样品厚度为  $10\sim 30\ \mu\text{m}$ ,满足横向尺寸远大于纵向尺寸的要求,因此,可忽略二维侧向稀疏效应。

2) 零压飞片。飞片碰撞样品后的应力波系传播是声速测量的关键,若撞击前飞片仍处于加速过程,飞片内部的应力波及压力状态会对后续的撞击物理过程产生影响,因此飞片撞击样品前应处于稳定飞行的零压状态。本文采用一维流体力学程序 HYADES 模拟  $100\ \text{J}$  条件下,激光辐照烧蚀层驱动高速飞片的物理过程,模拟结果列于表 1。由表 1 可看出,飞片越薄、烧蚀层越薄,飞片的最大速度越大,相应的飞片距离越长,且加速过程会出现多次加速过程。实验研究表明,飞片飞行距离过长,侧向稀疏、冲击波平面性等二维效应影响会愈加突出,

飞片易发生解体。从零压飞片的速度、飞行距离两方面考虑,本次实验飞片参数选择  $150\ \mu\text{m}$  厚烧蚀层、 $10\ \mu\text{m}$  厚飞片、 $100\ \mu\text{m}$  厚空腔,可满足碰撞前零压高速飞片的状态要求。

表 1 激光驱动高速飞片模拟结果  
Table 1 Simulation results  
of high speed flyer driven by laser

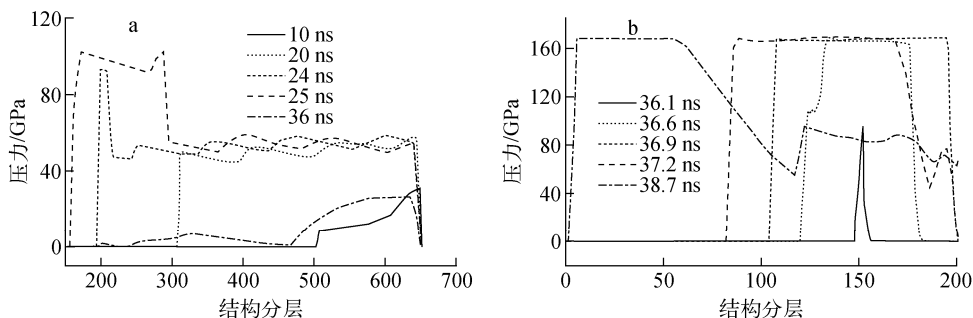
飞片厚度/ $\mu\text{m}$	烧蚀层 厚度/ $\mu\text{m}$	最大速度/ $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	飞行距离/ $\mu\text{m}$	加速 过程
5	50	26	350	多次
5	100	16	350	2次
5	150	11	120	单次
10	50	21	315	多次
10	100	14	305	2次
10	150	10.5	100	单次
15	50	18	300	多次
15	100	12	380	2次
15	150	10	98	单次

3) 透明窗口材料。主冲击波到达样品/窗口界面时,要求无反射或弱反射通过界面进入窗口材料,因此窗口材料必须与样品材料的阻抗匹配相当。实验用金属 Al 材料与单晶 LiF

窗口材料的阻抗非常接近,且单晶 LiF 材料在 200 GPa 下保持透明性,常用来作为加窗 VISAR 法的窗口材料。

4) 追赶比。主冲击波必须先于追赶稀疏波到达界面,即靶结构必须满足追赶比的要求。本文利用 HYADES 模拟 100 J 条件下激光驱动高速飞片撞击样品的碰撞物理过程,飞片参数选用零压飞片参数,样品厚度为 30  $\mu\text{m}$ ,如图 3 所示,其中 1~150 层为靶样品(30  $\mu\text{m}$ ),151~200 层为飞片(10  $\mu\text{m}$ ),201 层为空腔(100  $\mu\text{m}$ ),202~651 层为烧蚀层(150  $\mu\text{m}$ )。10 ns 烧蚀层已形成冲击波,20 ns 烧蚀层内冲击波基本稳定,24 ns 冲击波从烧蚀层进入飞

片,25 ns 该冲击波到达飞片自由面然后反射稀疏波进行压力卸载,36 ns 左右飞片达到稳定飞行的零压飞片状态,36.1 ns 飞片撞击样品产生两个方向相反的冲击波,36.9 ns 飞片中的冲击波到达飞片前表面反射追赶稀疏波,38.7 ns 主冲击波先于追赶稀疏波到达样品窗口界面。这说明该参数条件满足声速测量靶的追赶比要求,实验选用的靶样品薄膜多为 10、20、30  $\mu\text{m}$  3 种厚度,均符合追赶比要求。由于 HYADES 无 LiF 窗口材料的相关状态方程参数,因此无法模拟主冲击波进入窗口的后续物理过程。通常条件下,窗口材料厚度为 mm 量级,窗口材料的自由面卸载过程不会对声速测量产生影响。



a——烧蚀层与飞片中的冲击波物理过程;b——飞片与样品中的冲击波物理过程

图 3 激光驱动高速飞片撞击样品的应力波传输过程

Fig. 3 Wave propagation for laser driven impact between flyer and target

图 4 为激光驱动高压声速测量靶的结构和参数。实验用窗口为 2 mm 单晶 LiF。由于样品/窗口台阶靶制作难度较大,本次实验主要采用上述的平面靶结构,冲击波速度无法直接测量,需通过界面粒子速度计算获得。

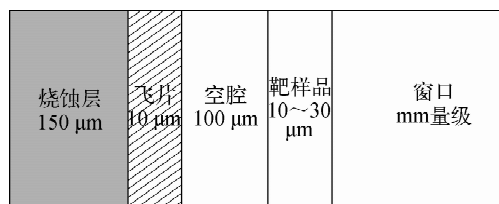


图 4 靶的结构和参数

Fig. 4 Structure and parameter of target

## 4 结果与分析

### 4.1 声速理论预估

在冲击压缩雨贡纽状态方程与冲击绝热线

的基础上,引入凝聚介质实用物态方程<sup>[6]</sup>来描述冲击压缩后的追赶稀疏等熵过程,则:

$$p = C_0^2(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho E \quad (5)$$

其中: $p$ 为压力; $\rho$ 为密度; $\rho_0$ 为零压密度; $C_0$ 为零压声速; $E$ 为比内能; $\gamma$ 为系数。

假定 $\gamma$ 在等熵过程中为常数,并由冲击压缩的终态参量确定(冲击压缩的终态代表等熵过程的初态),研究表明,该方程与格留纳森等熵方程差分求解结果相符,并可获得声速的理论预估解析表达式为:

$$C = \sqrt{\{[4\lambda - 2(1 - \rho_0/\rho_H)\lambda^2 - 1]p_H + \rho_0 C_0^2\}/\rho_H} \quad (6)$$

其中: $\rho_H$ 、 $p_H$ 分别为冲击压缩终态的密度与压力; $\lambda$ 为雨贡纽常数。

针对实验用 Al 材料,其相关参数为: $\rho_0 = 2.698 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_0 = 5.328 \text{ km/s}$ ,  $\lambda = 1.338$ 。图 5 为理论预估声速与冲击波压力的关系曲

线。可看出,在0~90 GPa 的压力范围内声速随压力的提高不断增大。但压力较大时,该方法获得的声速会小于冲击波速度,因此该方法不适用于高压阶段(200 GPa 以上)。

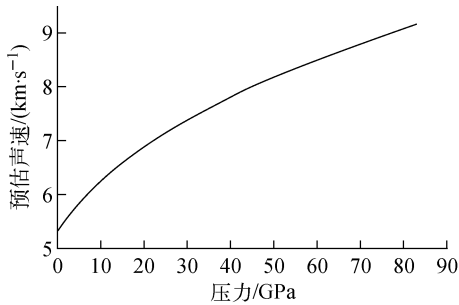


图5 理论预估声速与冲击波压力的关系曲线

Fig. 5 Curve of theoretical sound velocity vs shock pressure

## 4.2 实验结果

天光一号激光装置放大输出能量达 130 J, 光束传输损失 20%, 焦斑平顶桶中功率 65%, 中心平顶能量约为 70 J, 较模拟参数略低。实验采用的飞片厚度为 10  $\mu\text{m}$ , 靶样品厚度为 20  $\mu\text{m}$ 。图 6 为 20  $\mu\text{m}$  样品加窗 VISAR 法的条纹干涉图, 从图 6 中可看到清晰的条纹二次移动, 这两次移动分别对应着主冲击波与追赶稀疏波到达窗口界面的时刻。该干涉仪具有一定的空间分辨能力, 因此图像处理后采集其中 3 条条纹的数据并获得其对应的界面粒子速度随时间的变化曲线(图 7), 3 条条纹的速度轨迹基本相符, 对应的最大粒子速度基本相同, 这说明在移动过程中靶样品保持了很好的完整性。但速度曲线的中间平顶因冲击波不均匀性、成像非线性及读数误差等因素影响略有差别, 因此在计算稀疏波追赶时间差时采用 3 组数据的平均值。条纹移动对应的最大粒子速度约为 2.1 km/s。考虑到冲击压缩下窗口材料折射率的变化, 取修正因子为 1.243<sup>[7]</sup>, 样品/窗口界面实际粒子速度为 1.69 km/s, 由于本实验

采用的平面靶实验, 冲击波速度无法直接测量, 利用冲击波速度  $D$  与粒子速度  $u$  的线性关系 ( $D=C_0+\lambda u$ ) 计算获得, 相应的冲击波速度为 7.6 km/s, 冲击压力约为 35 GPa。3 条条纹追赶时间平均值为 2.5 ns, 对应的 Lagrange 纵波声速为 7.9 km/s, 声速预估曲线 35 GPa 下的预估声速为 7.7 km/s, 实验与理论预估结果基本相符。表 2 列出了各参数的测量结果及不确定度, 实验的主要不确定度来源是条纹相机的时间分辨(追赶时间差  $\Delta t$  的相对不确定度为 7%)与干涉仪系统的空间分辨(界面粒子速度  $u$  的相对不确定度为 4.7%), 时间分辨与条纹相机选用的扫描档量程有关, 而空间分辨与干涉仪系统选用的标准具厚度有关。

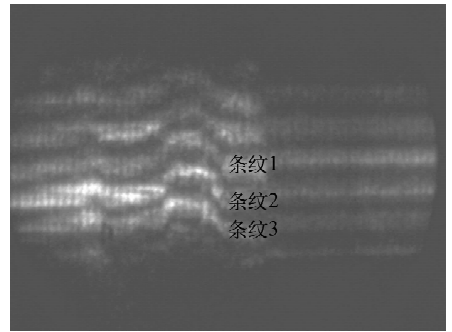


图6 20  $\mu\text{m}$  样品加窗 VISAR 法条纹干涉图  
Fig. 6 Interference pattern of window-VISAR method for 20  $\mu\text{m}$  sample

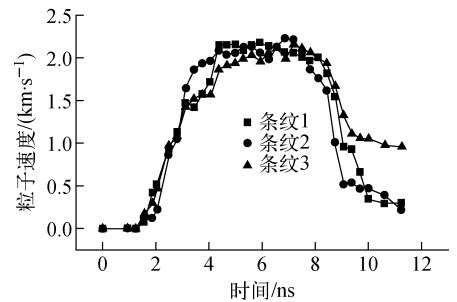


图7 样品/窗口界面的粒子速度随时间的变化  
Fig. 7 Interface particle velocity between sample and window vs time

表 2 各参数的测量结果及不确定度

Table 2 Measurement results and uncertainties of experiment parameters

$h/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$u/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta t/\text{ns}$	$C/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
10.15(0.14)	20.10(0.18)	1.69(0.08)	7.59(0.11)	2.51(0.18)	7.92(0.38)

注:括号内为不确定度

另外,本文还开展了  $10\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$  靶样品厚度的实验,但实验结果并不理想。 $30\ \mu\text{m}$  的靶样品追赶时间差很短,虽然观测到条纹二次移动,但追赶时间平顶无法准确读数。当前参数下激光驱动小尺寸声速靶的追赶时间约为  $3\ \text{ns}$ ,实验选用的  $50\ \text{ns}$  档的测量精度与分辨率明显不够,需采用更快扫速档(如  $10\ \text{ns}/5\ \text{ns}$  档)。但目前激光辐照系统的延迟抖动达  $\pm 10\ \text{ns}$ ,且受诊断系统(普克尔盒、机械快门、条纹相机)的延迟抖动、制靶工艺的影响, $20\ \text{ns}$  档捕捉到实验信号概率低, $10\ \text{ns}$  及以下很难捕捉到信号,这制约了声速测量精度的提高。

$10\ \mu\text{m}$  靶样品实验发生靶样品解体现象概率增大,出现测量的声速低于零压声速,经分析可能是样品组件平整性、制靶过程中组件装配等原因造成的。在声速测量实验中,制靶过程中的材料加工、表面处理、连接、安装等关键步骤对声速测量影响较大,飞片、样品薄膜的平整性、界面间隙等直接影响冲击压缩与追赶稀疏物理过程,特别是对于激光驱动条件下小尺度研究的影响更为显著,这是今后激光驱动声速研究需重点考虑解决的关键技术问题。

## 5 结论

本文开展了激光驱动冲击压缩下金属 Al 样品的加窗 VISAR 法高压声速测量,基于一维流体力学程序 HYADES 进行了一维平面冲击加载下飞片撞击靶样品的冲击波物理模拟与靶结构参数设计,获得了冲击加载与追赶稀疏引起的二次条纹移动图像,在  $20\ \mu\text{m}$  靶样品中获得了  $35\ \text{GPa}$  的冲击压力和  $7.9\ \text{km/s}$  的

Lagrange纵波声速,与理论预估的结果相符合。

## 参考文献:

- [1] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [2] DUFFY T S, AHRENS T J. Sound velocities at high pressure and temperature and their geophysical implications[J]. J Geophys Res, 1992, 97 (B4): 4 503-4 520.
- [3] DUFFY T S, AHRENS T J. Compressional sound velocity, equation of state, and constitutive response of shock-compressed[J]. J Geophys Res, 1995, 100(B1): 529-542.
- [4] 田宝贤,王钊,戴辉,等. 多路激光聚焦系统均匀性分析[J]. 原子能科学技术,2013,47(9): 1 633-1 636.  
TIAN Baoxian, WANG Zhao, DAI Hui, et al. Spatial uniformity analysis of multi-laser-beam focusing system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(9): 1 633-1 636(in Chinese).
- [5] 王钊,高爽,梁晶,等. 用于冲击诊断的成像型速度干涉仪[J]. 强激光与粒子束,2001,23(3): 661-665.  
WANG Zhao, GAO Shuang, LIANG Jing, et al. Imaging-velocity interferometer system for any reflector for shock diagnostics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 23(3): 661-665 (in Chinese).
- [6] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [7] 马云. 冲击载荷下 LiF 晶体折射率研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2003.